

QUEL MODE DE CHARGEMENT PERTINENT POUR ÉVALUER L'ANGLE DE FROTTEMENT DES INTERFACES GÉOSYNTHÉTIQUE-GÉOSYNTHÉTIQUE ?

WHICH RELEVANT LOADING METHOD TO ASSESS THE FRICTION ANGLE OF GEOSYNTHETIC-GEOSYNTHETIC INTERFACES?

Guillaume STOLTZ

Irstea Unité HBAN, Antony, France

RÉSUMÉ – La norme NF EN ISO 12957-2 utilisant un dispositif de type plan incliné peut être utilisée pour mesurer l'angle de frottement entre deux nappes de géosynthétiques à faible contrainte de confinement. Le principe de cette norme est d'augmenter la contrainte de cisaillement d'interface jusqu'à la rupture par glissement. Le principal objectif de cette étude est de comparer ce mode de chargement à celui de la boîte de cisaillement qui consiste à augmenter le déplacement de l'interface à vitesse constante avec enregistrement simultané de la contrainte de cisaillement d'interface. Les résultats montrent que l'angle de frottement au palier obtenu à la boîte de cisaillement est plus sécuritaire que celui obtenu au plan incliné.

Mots-clés : interface géosynthétiques, angle de frottement, mode de chargement, plan incliné, boîte de cisaillement.

ABSTRACT – Standard NF EN ISO 12957-2 involving an inclined plane device can be used to measure the interface friction angle between two layers of geosynthetics at low normal stresses. The principle of this standard increases shear stress until the interface slides. The main objective of this study was to compare this loading method with that of the shear box which increases displacement at a constant rate while recording shear stress. The results show that the shear box test enables the determination of both peak and residual friction angles, which is not possible with the inclined plane test. The results show that the residual friction angle from the shear box test is more reliable than the one from the inclined plane test.

Keywords: geosynthetics interface, friction angle, loading method, inclined plane, shear box.

1. Introduction

Les géosynthétiques (GSY) sont couramment utilisés dans des ouvrages géotechniques pour assurer plusieurs fonctions telles que l'étanchéité, le drainage, la filtration et la protection. Le dimensionnement de tels systèmes sur pentes requiert les caractéristiques de frottement aux interfaces sol-géosynthétique ou géosynthétique - géosynthétique. Ces caractéristiques sont essentielles dans le contexte du raidissement des pentes pour réduire l'emprise au sol des ouvrages ou optimiser leur volume comme c'est le cas pour les casiers des installations de stockage de déchets non dangereux (ISDND).

Les angles de frottement d'interfaces géosynthétiques peuvent être mesurés en utilisant une boîte de cisaillement selon la norme NF EN ISO 12957-1 (Afnor, 2005) ou en utilisant un dispositif de type plan incliné selon la norme NF EN ISO 12957-2 (Afnor, 2005). Dans l'essai à la boîte de cisaillement, la contrainte normale de confinement appliquée est comprise entre 50 et 150 kPa tandis qu'elle est égale à 5 kPa dans l'essai au plan incliné. Quand une fine couche de sol sur pente surmonte un complexe multicouches de géosynthétiques, l'essai au plan incliné, largement étudié (Koutsourais et al., 1991 ; Palmeira et al., 2002 ; Briançon et al., 2002), semble être le plus adapté. Le mode de chargement de l'essai au plan incliné consiste à augmenter de façon croissante la contrainte tangentielle de cisaillement jusqu'à rupture de l'interface par glissement. Ce mode de chargement est très différent de celui de l'essai à la boîte de cisaillement, qui consiste à imposer un déplacement de l'interface à vitesse constante. Plusieurs auteurs (Wasti et Özdüzgün, 2001 ; Reyes Ramirez et Gourc, 2003) ont comparé les résultats obtenus à partir des essais au plan incliné et à la boîte de cisaillement mais ces comparaisons sont souvent biaisées car les contraintes normales appliquées peuvent être différentes tout comme les moyens d'appliquer ses dernières (poids de sol uniquement dans le cas des essais au plan incliné et vérins hydrauliques dans le cas des essais à la boîte de cisaillement). De plus, les différents types et dimensions des appareillages induisent des effets de bords qui peuvent également contribuer à biaiser ses comparaisons.

Cette recherche a donc été conduite afin de comparer finement les deux modes de chargement décrits ci-dessus en testant deux interfaces GSY-GSY classiques. La première est composée d'un géotextile non-tissé aiguilleté surmontant une géomembrane PEHD de 2 mm d'épaisseur et la seconde est composée d'un géocomposite de drainage sur la même géomembranes PEHD. Les essais ont été réalisés à l'aide de deux dispositifs de type plan incliné et boîte de cisaillement à l'échelle métrique et en appliquant les mêmes conditions de confinement c'est-à-dire une même contrainte normale de 5 kPa, appliquée uniquement à partir du poids de sol dans le boîtier supérieur.

2. Matériels et méthodes

2.1. Boîte de cisaillement

La boîte de cisaillement de cette étude se compose d'un support plan sur lequel se déplace un boîtier supérieur reposant sur des rails. Les dimensions du boîtier supérieur sont de 1 m sur 0,94 m. Un treuil motorisé et connecté à une centrale d'acquisition contrôle la vitesse de déplacement de ce boîtier. Au cours de l'application d'une vitesse de déplacement constante, la force tangentielle d'interface est simultanément enregistrée à l'aide d'un capteur de force (Figure 1). Ce mode de chargement permet ainsi d'imposer un déplacement d'interface noté δ_{BC} .

La norme NF EN ISO 12957-1 est une procédure d'essai utilisant une boîte de cisaillement pour déterminer l'angle de frottement d'une interface sol-géosynthétiques sous de fortes contraintes de confinement, comprises entre 50 et 150 kPa. Dans le cadre de cette étude, des adaptations par rapport à l'essai selon la norme ont été faites pour plusieurs raisons : (1) la contrainte normale de confinement a été fixée à 5 kPa ; (2) la norme ne permet de tester que des interfaces sol – géosynthétiques ; (3) la norme détermine uniquement l'angle de frottement au pic de l'interface testée ; (4) la norme requiert un déplacement maximum de 50 mm, ce qui n'est pas suffisant dans le cas d'une interface testée de dimension métrique.

Dans l'essai à la boîte de cisaillement mené dans cette étude, les interfaces géosynthétique – géosynthétique ont été confinées avec une contrainte de confinement de 5 kPa appliquée uniquement par l'intermédiaire du poids de sol dans le boîtier supérieur. Le géosynthétique inférieur a été ancré au support et le géosynthétique supérieur a été ancré sur la face avant du boîtier supérieur. Le sol utilisé est un sable de granulométrie uniforme comprise entre 1 et 2 mm. L'essai à la boîte de cisaillement consiste à imposer un déplacement du boîtier supérieur à vitesse constante ($d\delta_{BC}/dt = 3 \text{ mm/min}$) tout en mesurant simultanément la force de cisaillement F par un capteur de force (Figure 1).

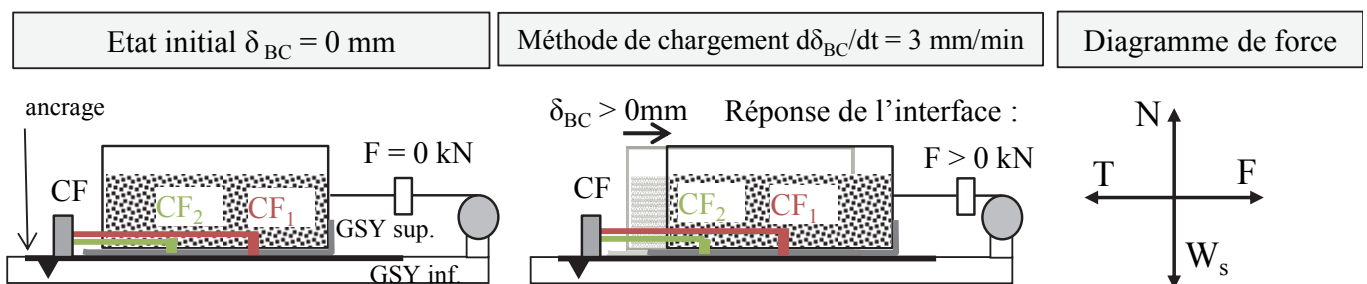


Figure 1. Schéma de principe de l'essai à la boîte de cisaillement.

Le déplacement est imposé jusqu'à atteindre au minimum 100 mm. Bien que la norme NF EN ISO 12957-1 requière uniquement la détermination de la contrainte de cisaillement maximale, selon la courbe (δ_{BC} , τ_{BC}), deux angles de frottement peuvent être déterminés : un angle de frottement de pic φ_{BCpic} (équation 1) et un angle de frottement résiduel φ_{BCres} (équation 2) :

$$\tan \varphi_{BCpic} = \frac{\tau_{BCpic}}{\sigma} \quad (1)$$

$$\tan \varphi_{BCres} = \frac{\tau_{BCres}}{\sigma} \quad (2)$$

où τ_{BCpic} est la contrainte de cisaillement maximale de la courbe (δ_{BC} , τ_{BC}) et τ_{BCres} correspond au plateau de la courbe (δ_{BC} , τ_{BC}).

Comme pour l'essai au plan incliné, trois tests sur des éprouvettes vierges ont été effectués pour chaque interface géosynthétique-géosynthétique étudiée. Pour mieux comprendre la mobilisation des efforts d'interface, 2 capteurs à fil (CF), fixés au support et au géosynthétique supérieur ont été utilisés (Figure 1).

2.2. Plan incliné

Le dispositif utilisé permet d'incliner un plan sur lequel repose un boîtier sur rails. Le géosynthétique inférieur est ancré à l'arrière du support inclinable et le géosynthétique supérieur est ancré à la face avant du boîtier. Les dimensions du boîtier sont de 1,00 m par 0,94 m. Un treuil motorisé connecté à une centrale d'acquisition contrôle la vitesse d'inclinaison du support. Quand l'inclinaison du support augmente, la force tangentielle d'interface T_{PI} augmente, due à l'inclinaison du poids de sol (Figure 2). Le mode de chargement se fait donc par contrôle de la force, ce qui implique qu'il n'y a aucun déplacement de l'interface testée tant que l'inclinaison du plan n'atteint pas une certaine valeur notée β_0 dans cette étude.

La norme NF EN ISO 12957-2 (AFNOR, 2005) est une procédure d'essai utilisant un dispositif de type plan incliné qui détermine un angle de frottement d'une interface géosynthétique – géosynthétique sous une faible contrainte de confinement égale à 5 kPa. L'essai consiste à augmenter l'inclinaison β du plan à vitesse constante et déterminer l'inclinaison β_{50} correspondant au déplacement du boîtier supérieur δ_{PI} égal à 50 mm (Figure 2). La vitesse d'inclinaison requise est égale à $d\beta/dt = 3,0 \pm 0,5^\circ/\text{min}$. La contrainte normale initiale σ_0 (c'est-à-dire pour $\beta = 0$ degré) est égale à $5,0 \pm 0,1$ kPa. Pour obtenir une contrainte normale uniforme sur l'ensemble de la surface testée, les parois avant et arrière du boîtier devraient être inclinées au début de l'essai de façon à être proche de la verticale au moment du glissement du boîtier supérieur. Ceci requiert une estimation a priori de l'inclinaison du plan qui induira le glissement. Au fur et à mesure que le support s'incline, la force tangentielle d'interface T_{PI} (équation 3) peut être déterminée selon le diagramme de force de la Figure 2 et s'écrit littéralement :

$$T_{PI}(\beta) = W_s \cdot \sin \beta + fr(\beta) \quad (3)$$

où W_s est le poids de sol et $fr(\beta)$ est la force résultante nécessaire pour retenir le boîtier supérieur vide.

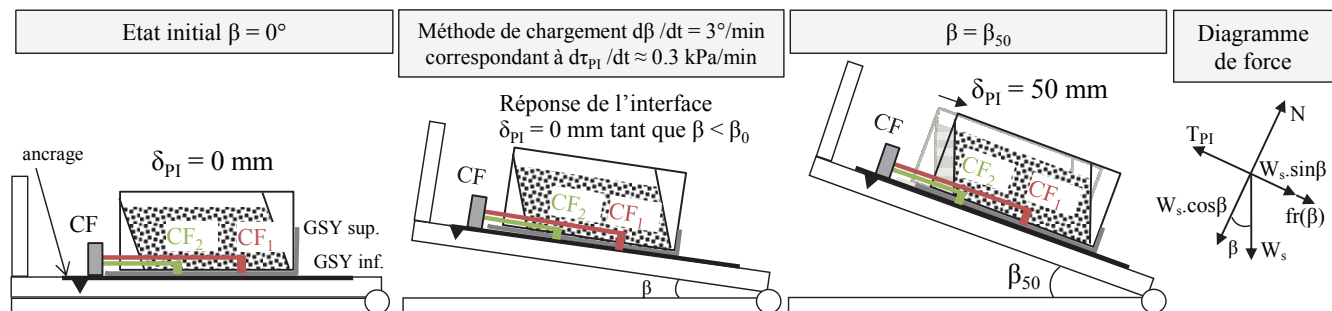


Figure 2. Schéma de principe de l'essai au plan incliné.

La norme détermine l'angle de frottement φ_{PI50} (équation 4) quand l'inclinaison β_{50} est atteinte, c'est-à-dire quand le boîtier supérieur glisse de façon à atteindre un déplacement tangentiel de 50 mm. L'angle de frottement d'interface φ_{PI50} peut être déterminé selon l'équation suivante :

$$\tan \varphi_{PI50} = \frac{\tau_{PI}(\beta_{50})}{\sigma_0 \cos(\beta_{50})} \quad (4)$$

Quand le déplacement tangentiel dépasse 50 mm, le boîtier supérieur est retenu par une chaîne, ce qui arrête l'essai. Comme pour l'essai au plan incliné, trois tests sur des éprouvettes vierges ont été effectués pour chaque interface géosynthétique-géosynthétique étudiée, ce qui a permis de déterminer un angle de frottement moyen correspondant à la moyenne arithmétique des trois angles déterminés. Le même sol a été utilisé pour les essais au plan incliné et à la boîte de cisaillement.

De façon à mieux comprendre la mobilisation des efforts de cisaillement d'interface, deux capteurs à fil (CF), fixés au support et au géosynthétique supérieur, ont été utilisés.

Il est utile de noter que l'équation (1) résulte d'une analyse statique alors que les conditions de glissement sont dynamiques, c'est-à-dire l'accélération du boîtier supérieur est négligée. C'est pourquoi certains auteurs, comme Reyes Ramirez et Gourc (2003), ont considéré que l'essai selon la norme pouvait conduire à une surestimation des angles de frottement des interfaces étudiées.

2.3. Matériaux

Trois produits géosynthétiques constituant deux interfaces géosynthétique – géosynthétique ont été testés. Pour chaque interface, le géosynthétique inférieur était une géomembrane PEHD de 2 mm d'épaisseur. Le géosynthétique supérieur de la première interface était un géocomposite de drainage, et le géosynthétique supérieur de la seconde interface était un géotextile non tissé aiguilleté composé de fibres vierges en polypropylène et ayant une masse surfacique de 800 g/m² environ. Pour chacune de ces interfaces, les tests de frottement ont été menés selon les procédures décrites ci-dessus.

3. Résultats et discussion

3.1. Boîte de cisaillement

Les courbes (δ_{BC} , τ_{BC}) et (t , δ_{BC}) de l'interface GMB PEHD/GSP obtenues pour le premier test sont présentées sur la Figure 3 et celles de l'interface GMB PEHD/GTX-N sont présentées sur la Figure 4. Pour les courbes (t , δ_{BC}), le déplacement du boîtier supérieur correspond à la courbe bleue tandis que les courbes rouge et verte correspondent au déplacement du produit mesuré par les deux capteurs à fil CF1 et CF2.

La Figure 3 (côté gauche) montre que les courbes (δ_{BC} , τ_{BC}) de l'interface GMB PEHD/GSP présentent un comportement de type pic-plateau peu significatif tandis que celles de l'interface GMB PEHD/GTX-N présentent un comportement de type pic-plateau fortement marqué. L'analyse des courbes (t , δ_{BC}), Figure 4 (côté droit), montre un décalage significatif entre le déplacement δ_{BC} et les déplacements des deux capteurs à fil, et la courbe (δ_{BC} , τ_{BC}), Figure 4 (côté gauche), montre qu'un déplacement de 10 mm est nécessaire pour mobiliser l'ensemble des efforts de cisaillement. Ceci peut s'expliquer par le fait que le géotextile non tissé aiguilleté n'était pas initialement en tension au début du test.

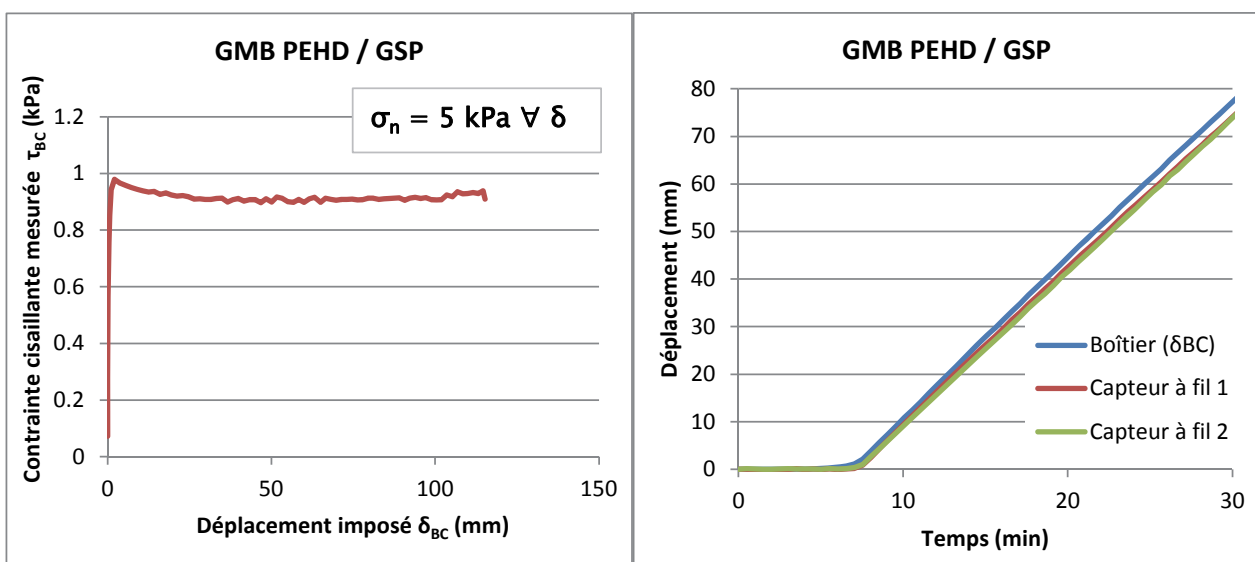


Figure 3. Exemple des courbes (τ_{BC} , δ_{BC}) et (t , δ_{BC}) obtenues selon le premier test à la boîte de cisaillement sur l'interface GMB PEHD / GSP.

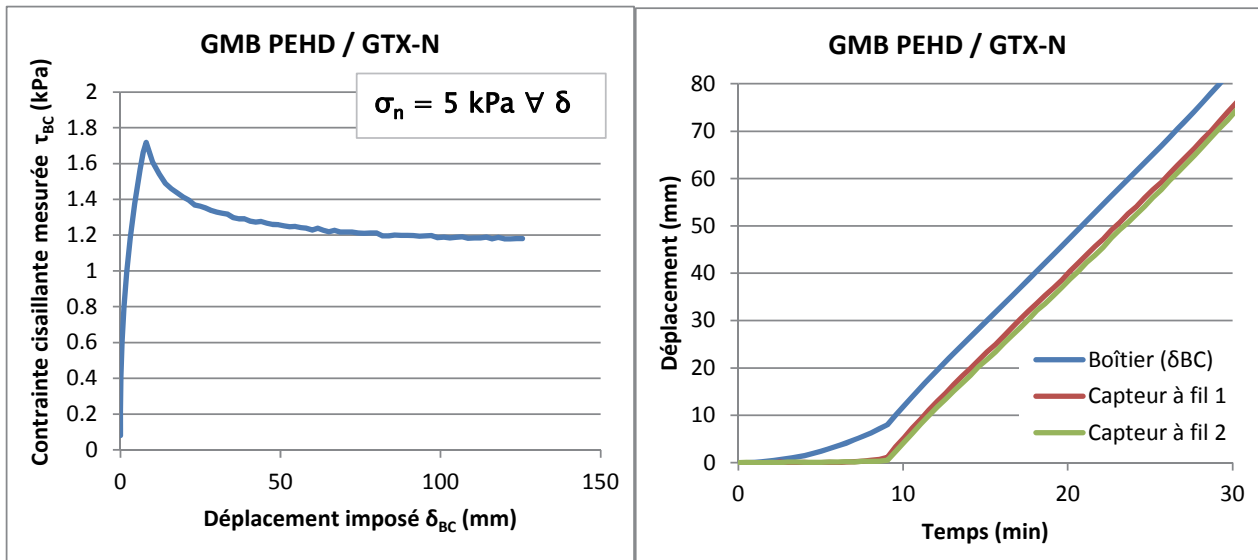


Figure 4. Exemple des courbes (τ_{BC} , δ_{BC}) et (t , δ_{BC}) obtenues selon le premier test à la boîte de cisaillement sur l'interface GMB PEHD / GTX-N.

3.2. Plan incliné

Le mode de chargement utilisé pour l'essai au plan incliné est par « contrainte de cisaillement imposée ». Comme la contrainte normale de confinement varie durant l'essai, il est plus pertinent de représenter les courbes (τ_{PI} imposé, δ_{PI} mesuré).

Les courbes (τ_{IP} , δ_{IP}) des deux interfaces testées GMB PEHD/GSP and GMB PEHD/GTX-N sont présentées sur les Figures 5 et 6. Le comportement en glissement des deux interfaces testées correspond à un comportement de glissement légèrement graduel (Pitanga et al., 2009), c'est-à-dire la valeur de l'inclinaison β_0 qui initie le mouvement est inférieure à l'inclinaison β_{50} qui est utilisée pour calculer l'angle de frottement. Comme il a été observé à partir de l'essai à la boîte de cisaillement sur l'interface GMB PEHD/GTX-N, les courbes (β , δ_{PI}) représentées sur les Figures 5 et 6 montrent un décalage entre le déplacement du boîtier supérieur et le déplacement des capteurs à fils. Ceci peut être dû à la mise en tension du géotextile au début de l'essai.

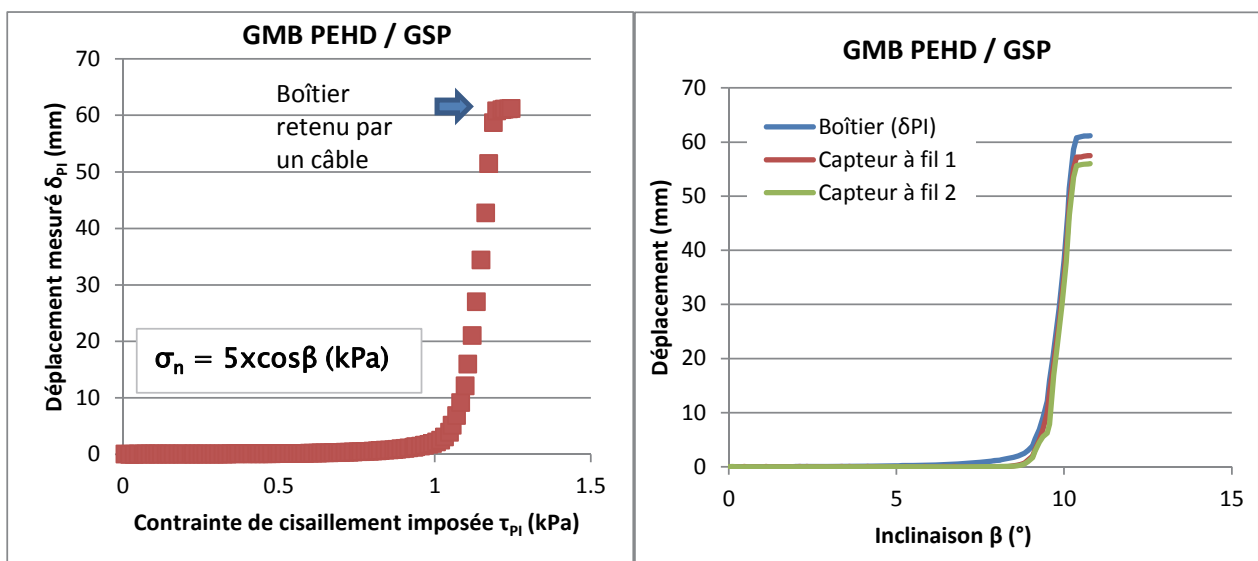


Figure 5. Exemple des courbes (τ_{PI} , δ_{PI}) et (β , δ_{PI}) obtenues selon le premier test au plan incliné sur l'interface GMB PEHD / GSP.

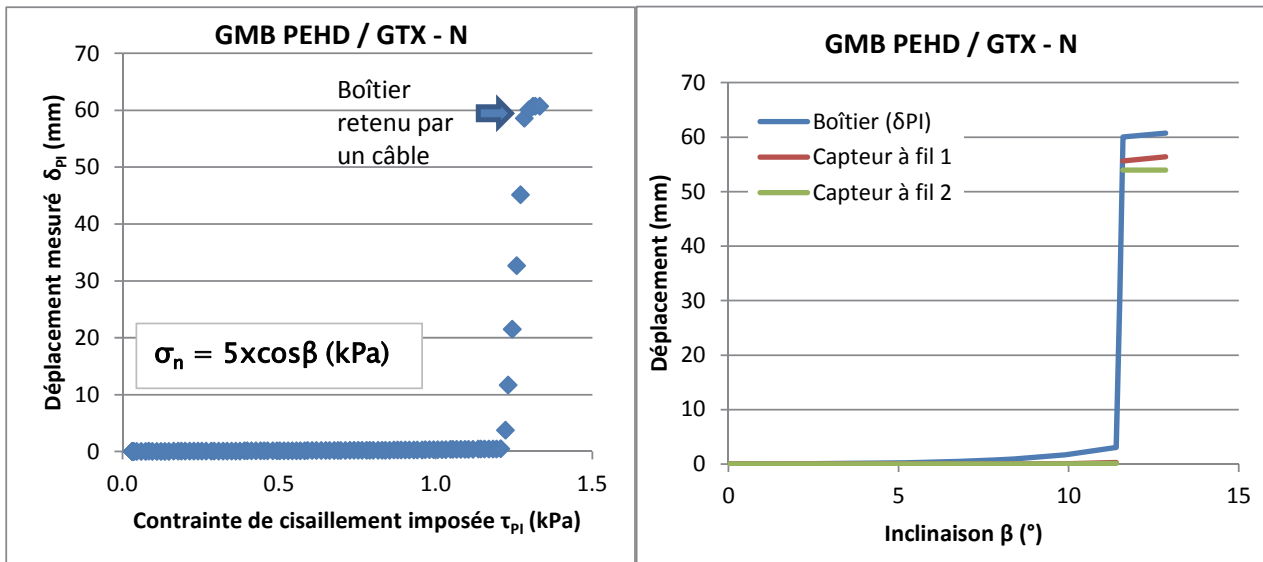


Figure 6. Exemple des courbes (τ_{PI} , δ_{PI}) et (β , δ_{PI}) obtenues selon le premier test au plan incliné sur l'interface GMB PEHD / GTX-N.

3.3. Comparaison des deux modes de chargement

Les résistances d'interface moyennes obtenues à partir des essais décrits ci-dessus sont présentées dans le Tableau 1.

Tableau 1. Résistances au cisaillement moyennes des interfaces testées obtenues suivants les essais à la boîte de cisaillement et au plan incliné.

Dispositif	Plan incliné $\sigma (t=0) = 5 \text{ kPa}$ (1 x 1 m ²)		Boîte de cisaillement $\sigma = 5 \text{ kPa}$ (1 x 1 m ²)			
	$\sigma_{PI} (\beta_{50})$ (kPa)	$\tau_{PI} (\beta_{50})$ (kPa)	$\sigma_{BC \text{ pic}}$ (kPa)	$\tau_{BC \text{ pic}}$ (kPa)	$\sigma_{BC \text{ res}}$ (kPa)	$\tau_{BC \text{ res}}$ (kPa)
GMB PEHD/GSP (3 éprouvettes)	4,91	1,26	5,00	0,97	5,00	0,93
GMB PEHD/GTX-N (3 éprouvettes)	4,90	1,31	5,00	1,59	5,00	1,15

Tableau 2. Angles de frottement moyens des interfaces testées obtenus suivants les essais à la boîte de cisaillement et au plan incliné.

Dispositif	Plan incliné $\sigma (t=0) = 5 \text{ kPa}$ (1 x 1 m ²)	Boîte de cisaillement $\sigma = 5 \text{ kPa}$ (1 x 1 m ²)	
	φ_{PI50}	φ_{BCpic}	φ_{BCres}
GMB PEHD/GSP (3 éprouvettes)	14,4 degrés	11,0 degrés	10,5 degrés
GMB PEHD/GTX-N (3 éprouvettes)	15,0 degrés	17,6 degrés	12,9 degrés

Il peut être noté que :

- dans le cas de l'essai au plan incliné, la contrainte de cisaillement estimée $\tau_{PI} (\beta_{50})$ est associée à une contrainte normale de confinement plus faible que celle initiale de 5 kPa ;
- dans le cas de l'essai à la boîte de cisaillement, les contraintes de cisaillement de pic et au palier (contrainte résiduelle) peuvent être déterminées.

Les angles de frottement moyens obtenus dans cette étude sont présentés dans le Tableau 2. Ils ont été calculés à partir des résistances d'interface présentées dans le Tableau 1 et en appliquant les équations (1), (2) ou (4) en fonction du type d'essai. Pour comparer les angles de frottement du Tableau 2, il est utile de rappeler que l'essai au plan incliné, dans lequel la contrainte de cisaillement est imposée de façon croissante, peut uniquement déterminer la contrainte de cisaillement à la rupture. Donc, si une interface présente un comportement en cisaillement de type pic-plateau dans la courbe (τ_{BC} , δ_{BC}), la valeur de résistance au pic devrait correspondre à celle obtenue à la rupture dans l'essai au plan incliné. En d'autres termes, l'angle de frottement obtenu selon la norme NF EN ISO 12957-2 devrait correspondre à celui obtenu au pic dans l'essai à la boîte de cisaillement. De plus, le léger comportement de glissement graduel obtenu pour les deux interfaces testées (Figures 5 et 6), implique que l'inclinaison β_0 qui induit le glissement est plus faible que l'inclinaison β_{50} qui est utilisée pour la détermination des angles de frottement dans le Tableau 2. Si β_0 avait été considéré, des angles de frottement légèrement plus faibles auraient été obtenus pour l'essai au plan incliné. Ceci montre que l'inclinaison β_{50} est arbitraire et non justifiée.

Il est noté également que l'angle de frottement de l'interface GMB PEHD/GSP obtenu dans l'essai au plan incliné est plus fort que celui obtenu au pic dans le cas de l'essai à la boîte de cisaillement alors que c'est l'inverse pour l'autre interface GMB PEHD/GTX-N. Les angles de frottement résiduels des deux interfaces obtenus par l'essai à la boîte de cisaillement sont dans tous les cas les plus faibles et donc correspondent aux valeurs les plus sécuritaires. Comme l'essai au plan incliné selon la norme NF EN ISO 12957-2 ne permet pas de mesurer des angles de frottement résiduel, il peut être supposé que le principe de l'essai à la boîte de cisaillement, c'est-à-dire par déplacement contrôlé, est le plus adapté pour déterminer des angles de frottement sécuritaires d'interfaces géosynthétique – géosynthétique. Pour le confirmer, plusieurs autres types d'interfaces devront être testés.

4. Conclusions

Le but principal de cette étude était de comparer précisément deux modes de chargement pour déterminer les caractéristiques de frottement des interfaces géosynthétique – géosynthétique à faible contrainte de confinement. Deux dispositifs d'échelle métrique ont ainsi été utilisés : un plan incliné et une boîte de cisaillement. Deux interfaces géosynthétique – géosynthétique classiques ont été testées. La première était composée d'un géotextile non – tissé aiguilleté surmontant une géomembrane PEHD de 2 mm d'épaisseur et la seconde était composée d'un géocomposite de drainage sur la même géomembrane PEHD.

Les résultats obtenus montrent que le mode de chargement par « contrainte de cisaillement imposée », c'est-à-dire correspondant à l'essai au plan incliné selon la norme NF EN ISO 12957-2 peut conduire à des angles de frottement surestimés par rapport à ceux obtenus des essais réalisés suivant le mode de chargement par « déplacement d'interface contrôlé » ; ce dernier permettant de déterminer des angles de frottement plus sécuritaires en considérant les résistances résiduelles, c'est-à-dire au palier. Cette étude est une étape pour le développement d'une procédure d'essai robuste pour la détermination des caractéristiques de frottement des interfaces géosynthétique – géosynthétique à faible contrainte de confinement.

5. Références bibliographiques

- AFNOR (2005). NF EN ISO 12957-1 (2005) Géosynthétiques – Détermination des caractéristiques de frottement, Partie 1 : Essais à la boîte de cisaillement. Comité européen de normalisation, Bruxelles.
- AFNOR (2005). NF EN ISO 12957-2 (2005) Géosynthétiques – Détermination des caractéristiques de frottement, Partie 2 : Essais sur plan incliné. Comité européen de normalisation, Bruxelles.
- Briançon L., Girard H., Poulin D., (2002). Slope stability of lining systems: experimental modeling of friction at geosynthetic interfaces. *Geotextiles and Geomembranes* 20 (3), pp. 147-172.
- Koutsourais M.M., Sprague C.J., Pucetas R.C. (1991). Interfacial friction study of cap and liner components for landfill design. *Geotextiles and Geomembranes* 10, pp. 531-548.
- Palmeira E.M., Lima Jr. N.R., Mello L.G.R. (2002). Interaction between soils and geosynthetic layers in large-scale ramp tests. *Geosynthetics International* 9, pp. 149-187.
- Pitanga H.N., Gourc J.-P., Vilar O.M. (2009). Interface shear strength of geosynthetics: evaluation and analysis of inclined plane test. *Geotextiles and Geomembranes* 27, pp. 435- 446.

- Reyes-Ramirez R., Gourc J.-P. (2003). Use of the inclined plane test in measuring geosynthetic interface friction relationship. *Geosynthetics International* 10, pp. 165-175.
- Wasti, Y., Özdüzgün, Z.B. (2001). Geomembrane–geotextile interface shear properties as determined by inclined board and direct shear box tests. *Geotextiles and Geomembranes* 19, pp. 45–57.